doi:10.13866/j. azr. 2018. 04. 01

黑河径流对 LUCC 和气候变化的敏感性分析①

罗开盛[1,2]， 陶福禄[2,3]

(1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,江苏 南京 210044;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101;
3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 为了定量评估径流对土地利用变化(LUCC)和气候变化的敏感性及其时空变异,基于土地利用、土壤、数字高程(DEM)、气象和实测径流数据,借助 SWAT 模型并结合统计方法定量评估了黑河径流对 LUCC 和气候变化的敏感性。结果表明:1980—2009 年流域径流对 LUCC 的敏感性值为0.020 mm · km^{-2}。径流对 LUCC 的敏感性从大到小分别是上游(0.108 mm · km^{-2})、中游(0.004 mm · km^{-2})和下游(0.001 mm · km^{-2})。1 mm 降雨变化在上游、中游和下游引起的产水量变化分别是0.49 ~0.288 mm、0.006 ~0.038 mm 和0 ~0.002 mm。1 ℃气温变化在上游、中游和下游引起的产水量变化分别是13.413 ~78.902 mm、1.105 ~6.500 mm 和0.461 ~2.710 mm。径流对气温的敏感程度要远远高于对降水的敏感度。在时间趋势上,径流对 LUCC 的敏感性表现出下降趋势;上游表现出减少趋势,而下游表现出增加趋势。流域径流对气温的敏感性表现为上升趋势。

关键词: 径流; 气候变化; LUCC; 敏感性; SWAT 模型; 黑河

土地利用变化(LUCC)可以通过改变能量平衡的方式间接影响流域水循环;也可以通过改变植物截留、蒸散发、下渗、地下水补给、基流和地表径流等水文要素的方式直接影响流域水循环[1]。气候变化对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响,进而导致水资源总量及其时空格局的改变[2]。因此,LUCC 和气候变化对水循环过程和水资源的影响的研究一直受到广泛关注。在流域尺度上,气候及 LUCC 相互作用对水文过程的影响会直接导致水资源供需关系的变化,进而对流域生态、环境以及经济发展等多方面产生影响[1-2]。LUCC 和气候变化已经成为影响流域水文水资源的重要因素。

SWAT 模型是基于物理机制的水文模型,由于其较为完善的模型结果和分布式模拟方式,在世界各地得到了广泛应用,其已经成为我国进行水文模拟的有效工具[3]。SWAT 模型在长江[4]、黄河[5]、海河[6]、渭河[7]、滦河流域[8]等湿润半湿润区域得到较好的结果。同时成功应用到干旱半干旱的叶尔羌河流域[9]、玛纳斯河流域[10]、石羊河流域[11]等。但总的来说,应用到干旱与半干旱的研究相对少些。这可能和模型的结构有关,SWAT 模型将现实中可能存在的沿子流域边界剖面的二维水分联系,概化为通过河道的一维联系[5-7],所以有研究认为 SWAT 模型在干旱区的某些地区不太适用,需要改进地下水模块。例如,程磊等[12]发现 SWAT 模型不能很好地模拟壤中流和基流,但是这种简化在河道输水量占主导的山区影响不大。有学者已成功将 SWAT 模型应用于黑河上中游区域,例如,Wu 等[13]构建了黑河中上游 SWAT 模型,评估了未来气候和土地利用变化对水文的影响。在这一地区,水分过程主要为降水、凝结水入渗、蒸发、人工取水-灌溉等,以垂向水分运动为主,横向水力联系较少见。因此,在以垂向水分运动为主导的黑河下游地区,SWAT 模型能较好地模拟蒸发,从而实现对水量平衡的近似表达。也正因为如此,Zang 等[14-15]已经成功将 SWAT 模型应用到整个黑河流域并取得了良好的模拟结果。

水是黑河流域环境变化的关键因素,但是上中下游受气候变化和人类活动的影响强度存在差异。研究表明气候变化和 LUCC 是影响流域的两大主要

① **收稿日期:** 2017-10-14; **修订日期:** 2018-01-03
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604703)和南京信息工程大学人才启动基金项目(2017r091)
作者简介: 罗开盛(1985-),男,讲师,博士,主要从事地表过程与模拟研究. E-mail: 002872@ nuist. edu. cn
通讯作者: 陶福禄. E-mail: taofl@ igsnrr. ac. cn

因素;不少学者定量研究了流域径流对气候变化和 LUCC 的响应[16]。但是流域径流对哪个因素更加敏感?是气候变化还是 LUCC?在上中下游存在何种差异?在时间上存在何种变异或者趋势?这些我们并不是很清楚。而回答这些问题需要探究黑河流域径流对 LUCC 和气候变化的敏感性。为此,本文利用 DEM、土壤、土地利用和气象数据驱动 SWAT 模型,通过实测径流数据对模型进行率定,借助 SWAT 模型并结合统计方法,定量评估了黑河流域径流对 LUCC 和气候变化的敏感性并揭示其时空变异。

1　研究区概况

黑河流域是中国第二大内陆河流域(38°~42° N,98°~101°E)(图1)。面积大约 14.31×10^5 km^2,年均径流量 34.43×10^8 m^3。流域地势南高北低,海拔 879~5 573 m。莺落峡和正义峡水文站分别是上游和中游的水文控制站。上游年均降水量大约 300 mm,年均气温在 -2.9~1.5 ℃;中游年均降水量 50~200 mm,年均气温 7.2~9.6 ℃,年均蒸发为 2 000~3 000 mm。下游年均降水量 40~50 mm,年均气温为 10.32 ℃,年均蒸发量达到 2 300~3 800 mm[17]。

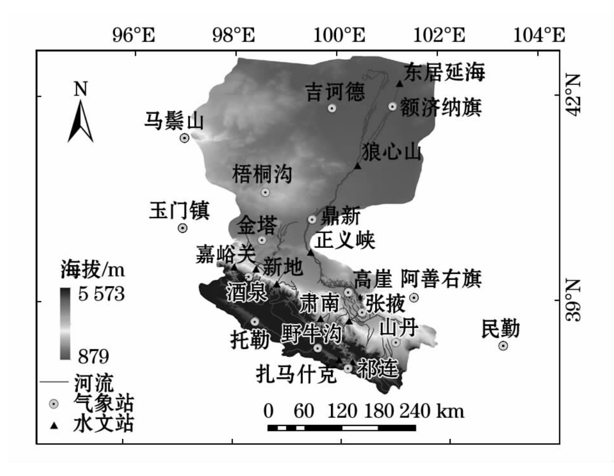


图1　黑河流域示意图

Fig. 1　Heihe River basin

2　数据与方法

2.1　数据收集与预处理

土地利用数据利用中国科学院环境数据中心(http://www.resdc.cn/)的 1:100 000 遥感监测数据。时间分别是 20 世纪 80 年代末期、1995 年、2005 年、2010 年 5 期,20 世纪 80 年代末期、1995 年的土地利用数据分别代表 1980s 和 1990s 的土地利用状况。2005 年的土地利用于初步模型的输入数据。

1980—2016 年的气象数据来自中国气象数据共享中心(http://cdc.cma.gov.cn/)和寒区与旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)。气象站点分别是祁连、吉诃德、梧桐沟、鼎新、金塔、酒泉、高台、托勒、野牛沟、张掖、山丹和额济纳旗。同时利用了邻近阿拉善旗、民勤、马鬃山和玉门镇等气象站的数据进行补充。利用 12 个气象站点的气象要素日值构建天气发生器以插补缺失的气象数据。

土壤数据利用联合国粮农组织的世界和谐数据库(Harmonized World Soil Database,简称 HWSD)的 HWSDV1.1 版本。SWAT 所需的大部分物理参数可通过 HWSD 自带的属性表中查询获得。但是土壤饱和容重(SOL_BD)、土壤层有效水量(SOL_AWC)、土壤饱和水力传导度(SOL_K)、土壤侵蚀力因子(USLE_K)等参数需要计算获得。SOL_BD、SOL_AWC、SOL_K 等 3 个参数值通过 SPAW(Soil Plant Atmosphere Water)的 SWCT (Soil - Water - Characteristics)模块计算获得。USLE_K 通过美国通用方程(USLE)计算获得。

数字高程(DEM)数据下载于 NASA 数据网站上(http://wist.echo.nasa.gov/api)的 ASTER Global DEM(简称 ASTER GDEM)。预处理包括投影转换和"填洼"处理。

河道年和月的实测径流数据用于模型的率定,数据来自于黑河流域管理局以及黑河流域水文年鉴。率定的水文站点包括上游的扎马什克、上游水文控制站—莺落峡、中游水文控制站—正义峡。

2.2　水文过程模拟

2.2.1　SWAT 模型的构建和率定　2005 年的土地利用数据用于模型初始的构建,将处理好的其他数据输入模型中构建 SWAT 模型。利用 SWAT - CUP2012 中的 SUFI - 2 算法进行模型的校准。利用决定系数(R^2)和纳西系数(NS)来衡量模型模拟结果[5]。决定系数衡量模拟值和实测值的拟合效果,范围为 0~1,值越大表示模拟效果越好[6]。一般 NS 值大于 0.45 模拟结果可以接受[5-6]。

2.3　敏感性分析方法

2.3.1　影响量分离方法　通过 9 个情景来定量分离黑河流域过去 30 a(1980—2009 年)LUCC 和气候对径流的影响量。M1、M2 和 m^3 用来定量分离

1980s 的 LUCC 和气候变化单独引起的径流变化量。M4、M5 和 M6 用来定量区分 1990 s 的 LUCC 和气候变化单独引起的径流变化量(表 1)。M7、M8 和 M9 用来计算 2000 s 的 LUCC 和气候变化单独引起的径流变化量(表 2)。径流总体变化利用产水量的变化来表征。每个年代中 LUCC 和气候变化引起的径流变化分上游、中游和下游分别进行定量区分。以 1980s 的 LUCC 和气候变化对径流变化的贡献为例。M1 是 1980s 的土地利用和 1980 s 的气候，M2 是 1980s 的土地利用和 1990s 的气候，产水量的变化 Y2 – Y1 是由气候变化所引起的变化量。m^3 是 1990s 土地利用和 1980s 的气候，那么 Y3 – Y1 就是 LUCC 所引起的变化量。同理，M4 是 1990s 的土地利用和气候，Y4 – Y1 则为 1980s 径流变化受到各种因素影响的综合变化量。(Y4 – Y1) – (Y2 – Y1) – (Y3 – Y1)是其他因素对径流变化的影响量，称为残差。2000s 的 LUCC 和气候变化单独引起的径流变化量通过 M7、M8、M9 计算获得。把 2000—2016 年分成 2000—2008 年和 2009—2016 年 2 个时段来近似获得 2000s 的 LUCC 和气候变化单独引起的径流变化量。

2.3.2　*敏感性计算方法*　本研究利用产水量表征径流。为了反映径流随着 LUCC 和气候的微小变化而变化的影响程度，利用产水量对 LUCC 和气候变化的敏感性值来评估径流对二者的敏感性。模型输出的产水量函数 Y 受到土地利用 L，气候 C 以及其他因素 Q_i 的影响。

$$Y = F(L, C, O_1, O_2, \cdots, O_i) \tag{2}$$

LUCC 的敏感性用数学方程可表示为：

$$S_L = \frac{\Delta Y}{\Delta L} \tag{3}$$

式中：S_L是径流对 LUCC 的敏感性值；ΔY 是产水量的变化量；ΔL 是对应时间段内土地利用(LUCC)的变化量。通过比较不同情境产水量和土地利用的变化量，可得到对应时间内径流对 LUCC 的敏感性。

径流对气候变化的敏感性用数学方程可表示为：

$$S_C = \frac{\Delta Y}{\Delta C} \tag{4}$$

式中：S_C 是径流对气候变化的敏感性值；ΔY 是产水量的变化量；ΔC 是对应时间段内气象要素的变化量。由于气象要素的量纲不同，而且不知道影响量的累加权重，因此无法准确获得径流对整个气候变化的敏感性值。虽然气象包括气温、降水、风速、相对湿度、日照时间和气压等 6 个要素，但径流过程主要受到气温和降水的影响。因此只需要估算径流对气温和降水的敏感性。气温和降水具体的敏感性值不能获得，但是可以获得敏感性的取值范围[S_{min}，S_{max}]，假设 ΔY 是气候变化引起的综合变化量。如果气象 6 要素同等重要，权重为 1/6，然而气温和降雨是主要因子，二者权重要大于 1/6；那么气温或者降水在综合变化量的权重在(1/6，1)之间，以降水为例，降水敏感性的最大值和最小值可表示为：

$$S_{min} = \frac{\Delta Y}{6\Delta P} \tag{5}$$

$$S_{max} = \frac{\Delta Y}{\Delta P} \tag{6}$$

式中：S_{min} 和 S_{max} 分别是降水敏感性的最小值和最大值；ΔY 是产水量的变化量；ΔP 是对应时间段内降水的变化量。利用相同的方法可以求出气温敏感性的最大值、最小值和取值范围。如果降水与气温的敏感性最小值都大于 LUCC 敏感性值，则说明径流对气候变化更加敏感。

表 1　评估 LUCC 和气候变化在 1980s 和 1990s 贡献率的控制实验情景

Tab. 1　A list of the different modeling experiments to evaluate the impacts of LUCC and climate in 1980s and 1990s

实验情景	土地利用数据	气候数据
M1	1980s	1980s
M2	1980s	1990s
m^3	1990s	1980s
M4	1990s	1990s
M5	1990s	2000s
M6	2000s	1990s

表 2　分离 2000s 的 LUCC 和气候变化贡献率的控制实验情景

Tab. 2　A list of the different modeling experiments to evaluate the impacts of LUCC and climate in 2000s

实验	土地利用数据	气候数据
M7	2005	2000 – 2008
M8	2005	2009 – 2016
M9	2010	2000 – 2008

3 结果与讨论

3.1 土地利用和气候变化

流域上游、中游和下游在 1980s 气温最低，1990s 上升，2000s 最高，气温有明显的升高趋势。在 1980s 和 1990s，上游气温的变化量都最大，分别升高了 1.46 ℃和 1.37 ℃；在 1980s，中游气温的变化量小于下游，但是在 1990s 中游气温的变化量稍微大于下游，差别不大。2000s 气温最低的是上游区域，为 -1.99 ℃(表 3)。

表 3 1980—2009 年黑河流域各年代平均气温

Tab. 3 Mean temperature in each decade in the Heihe River basin during 1980—2009 /℃

	1980s	1990s	2000s
流域	4.84	5.41	5.89
上游	-5.18	-3.72	-1.99
中游	7.49	8.06	8.50
下游	8.72	9.47	9.9

表 4 1980—2009 年黑河流域各年代降水量

Tab. 4 Annual precipitation in each decade in the Heihe River basin during 1980—2009 /mm

	1980s	1990s	2000s
流域	1 833.29	1 804.34	1 946.21
上游	3 923.47	3 656.27	4 004.87
中游	1 178.52	1 211.86	1 269.77
下游	334.6	507.65	428.59

如表 4 所示，上游降水量在各年代都是最高。上游和中游在 2000s 的降水量最多，下游地区的降水量在 1990s 最多。1980s 降水量变化最大的是下游区域，增加了 173 mm。1990s 降水量变化最大的区域是上游区域，增加了 348.6 mm。2000s 中游降水量最多，为 4 004.87 mm。

3.2 土地利用变化

上游 1980s 变化最大的是草地和城乡 - 工矿 - 居民用地，1990s 变化最大的是水体和草地，2000s 变化最大的是未利用土地和耕地。林地总体上有所下降。耕地和草地有增有减。中游人工表面一直保持持续增长的趋势。耕地在 1980—2010 年间变化面积最大，且为扩大趋势。中游耕地和城乡 - 工矿 - 居民用地在 1980—2010 年变化速率最大，且为持续增长。未利用土地在 1980—2010 年一直在减小。草地总体呈现减少趋势。耕地总体上在扩张。下游林地、草地和未利用土地在 1980—2010 年表现为减少，而耕地、城乡 - 工矿 - 居民用地总体上在扩大。就整个流域而言，城乡 - 工矿 - 居民用地在过去 30 多年(1980—2009 年)不断扩大；耕地从 1990s 开始迅速扩大；草地、水体和未利用土地有增有减。

3.3 校准和验证结果

采用 *NS* 系数、R^2 评估模型的性能。在年尺度上，莺落峡水文站在校准期和验证期的 *NS* 系数分别是 0.84 和 0.79；R^2 分别是 0.96 和 0.93。正义峡水文站在校准期和验证期的 *NS* 系数分别是 0.67

表 5 黑河流域土地利用变化

Tab. 5 Land use change in the Heihe River basin /km²

	时段	林地	草地	耕地	城乡 - 工矿 - 居民用地	水体	未利用土地
上游	1980s	-48.57	-176.02	1.19	247.95	0.27	-26.36
	1990s	9.05	192.52	-0.03	-0.05	-246.86	45.14
	2000s	-26.88	-24.22	352.64	45.42	33.22	-380.98
	1980 - 2010	-43.46	14.4	1.63	0.18	0.01	26.56
中游	1980s	52.95	205.80	-302.60	12.98	149.25	-64.39
	1990s	-79.64	-442.49	802.31	54.10	-181.18	-182.92
	2000s	-11.89	-23.88	278.90	47.92	2.19	-293.27
	1980 - 2010	-30.00	-210.23	525.01	68.00	-30.26	-312.04
下游	1980s	-418.33	359.12	2.02	-7.35	-40.65	105.74
	1990s	410.24	-527.46	84.86	10.96	66.27	-43.84
	2000s	-10.50	12.66	80.33	1.03	33.44	-116.46
	1980 - 2010	-9.79	-6.27	88.84	2.97	35.45	-109.81
整个流域	1980s	-383.77	732.87	-350.36	5.17	307.60	-311.23
	1990s	323.94	-1117.82	947.77	65.66	-311.89	92.96
	2000s	-26.88	-24.22	352.64	45.42	33.22	-380.98
	1980 - 2010	-68.19	-343.94	628.14	71.13	5.52	-292.56

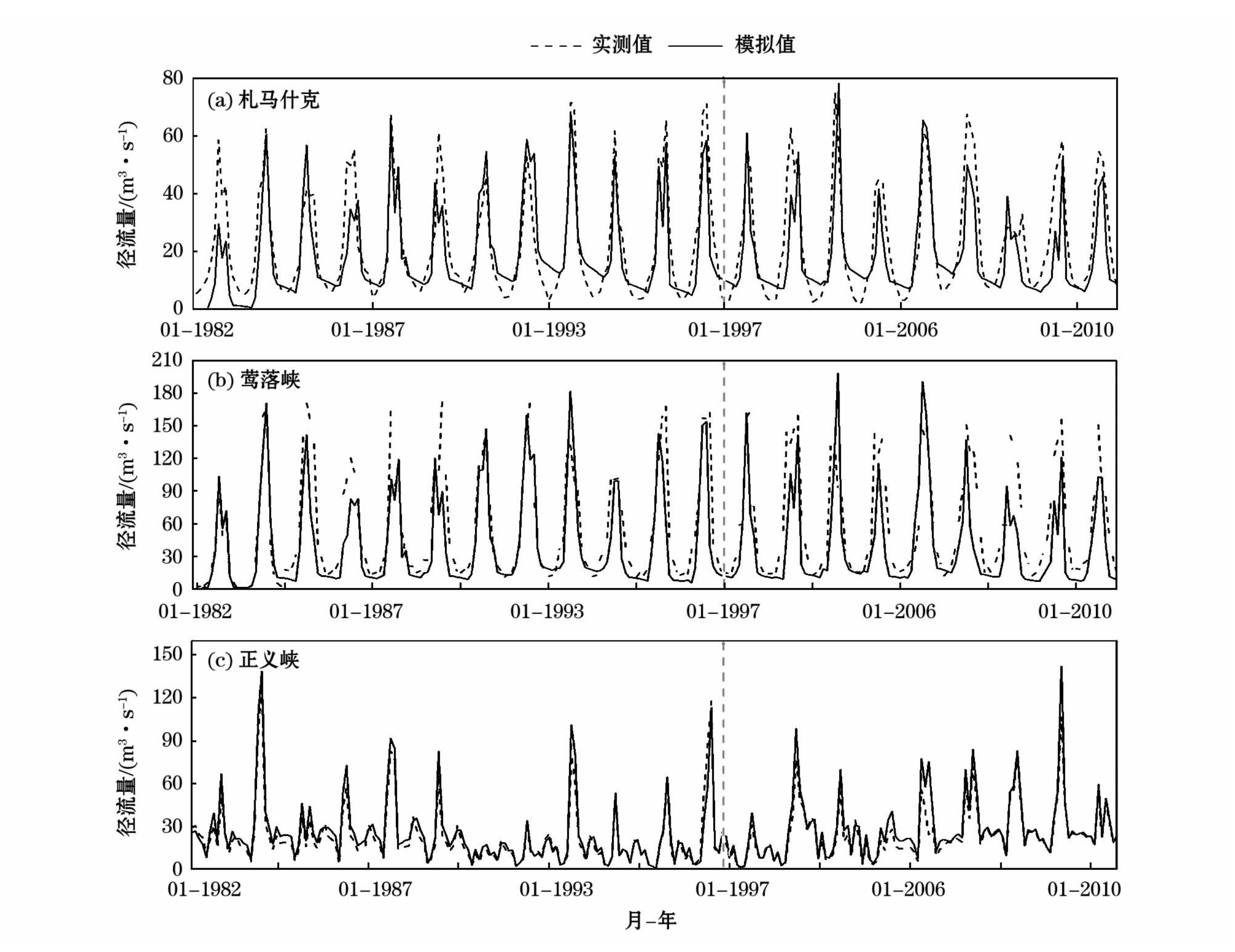


图 2　SWAT 模型在札马什克、莺落峡和正义峡水文站的径流模拟值和实测值的对比

Fig. 2　Comparison of simulated runoff and observed runoff at Zamashenke, Yinluoxia and Zhengyixia hydrological stations

表 6　SWAT 模型模拟结果评估

Tab. 6　Performance of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

时间尺度	水文站点	校准期（1982－1997 年）		验证期（1998－2010 年）	
		R^2	*NS*	R^2	*NS*
年尺度	札马什克	0.92	0.78	0.90	0.74
	莺落峡	0.85	0.75	0.80	0.73
	正义峡	0.68	0.67	0.63	0.55
月尺度	札马什克	0.95	0.76	0.90	0.74
	莺落峡	0.90	0.71	0.80	0.73
	正义峡	0.73	0.56	0.63	0.55

和 0.55；R^2 分别是 0.68 和 0.63。在月尺度上，莺落峡水文站在校准期和验证期的 *NS* 系数值分别是 0.71 和 0.73。其结果表明所构建的模型性能比较好，特别是上游区域。SWAT 模型对径流的模拟效果比较好，但是峰值的模拟效果相对较差（图 2）。这可能是由于模型对地下水过程刻画比较概化的原因所导致的。总的来看，构建的 SWAT 模型完全可以满足本次研究的需要。

3.3　径流对气候变化的敏感性

表 7 列出了径流对平均气温的敏感性值。上游区域 1980s 径流对平均气温敏感性的最大值趋近于 49.87 mm · ℃⁻¹，也就是气温变化 1 ℃，径流将会变化 49.87 mm；敏感性取值范围是 8.478～49.970 mm · ℃⁻¹。1980s 上游径流对气温的敏感性取值范围要远远大于中游和下游，因为上游的最小值都比中游和下游的最大值大。上游区域 2000s 的敏感性值在 1980—2009 年，是 1980s 和 1990s 的 10 倍左右。1990s 下游区域的敏感性取值范围最小，为 0.360～2.116 mm · ℃⁻¹。2000s 上游敏感性取值范围最大，为 108.250～636.765 mm · ℃⁻¹。在 1980－2009 年，黑河上游区域径流对气温的敏感性最大；中游敏感性要比下游稍大一些，因为中游的敏感性取值范围的最小值相对更大。

表 7 径流对平均气温的敏感性

Tab. 7 Sensitivity of mean temperature /mm · ℃$^{-1}$

年代	流域		上游		中游		下游	
	S_{tmin}	S_{tmax}	S_{tmin}	S_{tmax}	S_{tmin}	S_{tmax}	S_{tmin}	S_{tmax}
1980s	2.365	13.912	8.478	49.870	0.256	1.509	0.456	2.680
1990s	4.753	27.958	8.259	48.584	2.140	12.591	0.360	2.116
2000s	25.816	151.857	108.250	636.765	1.270	7.471	0.824	4.846
1980 – 2009 年	10.978	64.576	13.413	78.902	1.105	6.500	0.461	2.710

注：S_{tmin}是最小敏感性值；S_{tmax}是最大的敏感性值。

表 8 径流对平均降水的敏感性

Tab. 8 Sensitivity of precipitation /mm · mm^{-1}

年代	流域		上游		中游		下游	
	S_{pmin}	S_{pmax}	S_{pmin}	S_{pmax}	S_{pmin}	S_{pmax}	S_{pmin}	S_{pmax}
1980s	0.044	0.274	0.044	0.272	0.004	0.026	0.002	0.012
1990s	0.015	0.095	0.039	0.241	0.015	0.096	0.002	0.012
2000s	0.021	0.130	0.057	0.357	0.002	0.011	0.002	0.010
1980 – 2009 年	0.027	0.166	0.049	0.288	0.006	0.038	0.000	0.002

注：S_{pmin}是最小敏感性值；S_{pmax}是最大的敏感性值。

表 8 中列出了产水量对降水的敏感性值。可以看出，1980s 黑河流域上游敏感性值的取值范围大于中游和下游区域，为 0.044 ~ 0.272 mm · mm^{-1}，相当于降水改变 1 mm，径流将会变化 0.044 ~ 0.272 mm。而中游和下游降水分别改变 1 mm，径流则要改变 0.004 ~ 0.026 mm 和 0.002 ~ 0.012 mm。1990s 下游径流对降水的敏感性值最低，降水改变 1 mm，径流仅仅变化 0.002 ~ 0.012 mm。2000s 上游区域的敏感性取值范围最大，为 0.057 ~ 0.357 mm · mm^{-1}，相当于降水改变 1 mm，径流将会变化 0.057 ~ 0.357 mm；中游和下游差不多，当降水改变 1 mm，径流改变 0.002 ~ 0.01 mm。1980—2009 年，流域上游敏感性取值范围大于中游区域和下游区域，径流对降水的敏感性最大，1 mm 所引起的径流变化为 0.49 ~ 0.288 mm。中游区域径流对降水的敏感性取值范围大于下游，为 0.006 ~ 0.038 mm · mm^{-1}。下游径流对降水最不敏感，敏感性取值范围为 0 ~ 0.002 mm · mm^{-1}。

径流对气温和降水的敏感性存在时空差异。上游最敏感，中游低一些，下游最小。各区域径流对气温和降水的敏感性在 1980—2009 年间波动。同时发现，径流对气温的敏感程度要远远高于对降水的敏感度。上游祁连山的冰雪融水是径流的重要补给源，气温的持续上升导致冰雪融化。研究表明 1980s 以来气温的升高导致冰雪持续融化，并导致径流的增加[8-9]。农田是中游的主要土地利用方式，气温的升高将会导致蒸发能力增强，实际蒸发量增加，对径流的变化产生直接的影响。而下游区域地表径流量很小，降水稀少，气候变化对水文的影响主要表现为垂直方向[10]，气温升高对地下水系统的影响相对更直接。

3.4 径流对 LUCC 的敏感性

表 9 列出了径流对 LUCC 的敏感性值，在 1980s，上游土地利用变化 1 km^2，径流将变化 0.114 mm，敏感性最大；在 2000s 的值为 0.080 mm · km^{-2}，敏感性最小。上游区域的敏感性值在 1980—2009 年逐渐降低。中游区域在 1980s 敏感性值最大，土地利用变化 1 km^2，径流将变化 0.016 mm。中游径流对 LUCC 敏感性值总体呈下降趋势，但中间有波动，而且比上游同期值要小；下游 1980s 的值最小，接近零；2000s 的值最大，为 1.235 mm · km^{-2}。下游区域敏感性值 1980—2009 年不断增加。

表 9 径流对 LUCC 的敏感性

Tab. 9 Sensitivity of land – use /mm · km^{-2}

年代	流域	上游	中游	下游
1980s	0.031	0.114	0.016	0.000
1990s	0.016	0.103	0.000	0.002
2000s	0.002	0.010	0.001	1.235
1980 – 2009 年	0.020	0.108	0.004	0.001

在 1980—2009 年,上游区域径流对 LUCC 最为敏感,其次是中游,再次是下游;上游、中游和下游径流对 LUCC 的敏感性值分别是 10.108 mm · km^{-2}、0.004 mm · km^{-2} 和 0.001 mm · km^{-2}。在上游地区,径流对 LUCC 的敏感性在不断减小,在 2000s 最小。尽管中游区域 LUCC 对径流的影响最大,但是径流对 LUCC 的敏感程度要远远小于上游区域,而且敏感程度呈现出变小趋势。下游区域径流对 LUCC 的敏感性最小,但有增加趋势,特别是 2000s。

LUCC 是人类活动的集中体现,LUCC 对径流的影响一定程度上体现了人类活动对径流的影响。黑河上游区域是整个流域的产流区,自然环境恶劣,人口稀少,受人类活动的干扰很小,正因为如此,生态系统相对比较脆弱,抵抗外界干扰的能力和适应环境变化的能力较中游和下游要小得多,一旦干扰强度和频率超过生态系统的承受能力,将会产生严重的后果。中下游区域,特别是中游区域,是经济中心和人口集中地,在长期的人类活动干扰下,水文系统在不断地适应和自我调节,敏感性降低,而稳定性增强。

3.5　研究的局限性

SWAT 水文模型的参数多且模型的校准比较复杂,存在一定的不确定性。与此同时,黑河中游是高强度人类活动影响区,地表水与地下水转化关系复杂,SWAT 模型对地下水模拟较为概括。这些都不可避免造成模型模拟的结果具有一定的误差。在后续的研究中需要进行 SWAT 模型的地下水模块改进与 MODFLOW 耦合来改善地下水模拟的研究工作。

4　结 论

(1) 流域上游径流对降雨敏感性取值范围大于中游和下游,1 mm 降雨变化在上游、中游和下游所引起径流的变化分别是 0.49 ~ 0.288 mm、0.006 ~ 0.038 mm 和 0 ~ 0.002 mm。径流对气温的敏感性从大到小依次是上游、中游和下游。气温变化 1 ℃ 在上游、中游和下游所引起径流的变化量分别是 13.413 ~ 78.902 mm、1.105 ~ 6.500 mm 和 0.461 ~ 2.710 mm。同时发现,径流对气温的敏感程度要远远高于对降水的敏感度。

(2) 黑河流域径流对 LUCC 的敏感性值为 0.020 mm · km^{-2}。1980—2009 年上游区域径流对 LUCC 的敏感性最大,为 0.108 mm · km^{-2}。其次是中游,敏感性值是 0.004 mm · km^{-2}。下游区域最小,敏感性值为 0.001 mm · km^{-2}。

(3) 从时间趋势上看,整个流域径流对 LUCC 的敏感性表现出下降趋势;但存在空间差异,上游表现出下降趋势,而下游却表现为增加趋势。流域径流对气温的敏感性表现为上升趋势。

参考文献(References):

[1] Prestele R, Arneth A, Bondeau A, et al. Current challenges of implementing anthropogenic land – use and land – cover change in models contributing to climate change assessments[J]. Earth System Dynamics, 2017, 8(2): 369 – 386.

[2] Zare M, Mohammady M, Pradhan B. Modeling the effect of land use and climate change scenarios on future soil loss rate in Kasilian watershed of northern Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(8): 305.

[3] Senent – aparicio J, Pérez – sánchez J, Carrillo – garcía J, et al. Using SWAT and fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain)[J]. Water, 2017, 9(2): 149.

[4] 张小咏,李佳,杨艳昭,等. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. 西北林业大学学报, 2012, 27(5): 38 – 45. (Zhang Xiaoyong, Li Jia, Yang Yanzhao, et al. Runoff simulation of the catchent of the Yangtze River based on SWAT model[J]. Journal of Northwest forestry University, 2012, 27(5): 38 – 45.

[5] Tang Y, Tang Q, Tian F, et al. Responses of natural runoff to recent climatic changes in the Yellow River basin, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(11): 4 471 – 4 480.

[6] 王中根,朱新军,夏军,等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进, 2008, 27(4): 1 – 6. [Wang Zhonggen, Zhu Xinjun, Xia Jun, et al. Study on distributed hydrological model in Hai River Basin[J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 1 – 6.]

[7] 左德鹏,徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI – 2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 490 – 496. [Zuo Depeng, Xu Zongxue. Distributed hydrological simulation using SWAT and Sufi – 2 in the Wei River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 490 – 496.]

[8] 李莹,黄岁樑. 滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2 463 – 2 475. [Li Yin, Huang Suiliang. Effects of landscape pattern change on flow and sediment processes in the Luanhe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2 463 – 2 475.]

[9] 梁建辉. 基于 SWAT 模型的新疆叶尔羌河流域气候变化对区域地下水动态影响研究[J]. 地下水, 2017, 39(4): 232 – 233. [Liang Jianhui. Dynamic impact study of climate change on regional groundwater in Xinjiang Yarkant River Basin based on SWAT model[J]. Ground Water, 2017, 39(4): 232 – 233.]

[10] 李慧,雷晓云,包安明,等. 基于 SWAT 模型的山区日径流模拟

在玛纳斯河流域的应用〔J〕. 干旱区研究,2010,27(5):686 –690.〔Li Hui,Lei Xiaoyun,Bai Anming,et al. Application of simulation about montanic daily runoff volume in the Manas River Basin based on SWAT model〔J〕. Arid Zone Research,2010,27(5):686 –690.〕

〔11〕张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 气候变化下石羊河流域径流模拟与影响量化〔J〕. 资源科学,2013,35(3):601 – 609.〔Zhang Yongyong,Zhang Shifeng,Zhai Xiaoyan,et al. Runoff simulation on the impact of climate change in the Shiyang River Basin〔J〕. Resources Science,2013,35(3):601 –609.〕

〔12〕程磊,徐宗学,罗睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例〔J〕. 地理研究,2009,28(1):65 – 73.〔Cheng Lei,Xu Zongxue,Luo Rui,et al. SWAT application in arid and semi – arid region :A case study in the Kuye River Basin〔J〕. Geographical Research,2009,28(1):65 –73.〕

〔13〕Wu F,Zhan J,Su H,et al. Scenario – based impact assessment of Land Use/Cover and Climate Changes on watershed hydrology in Heihe River Basin of Northwest China〔J〕. Advances in Meteorology,2014,2014,(3):1 –11.

〔14〕Zang C F,Liu J,Velde M V D,et al. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows in inland river basins in Northwest China〔J〕. Hydrology & Earth System Sciences,2012,16(8):2 859 –2 870.

〔15〕Zang C,Liu J,Gerten D,et al. Influence of human activities and climate variability on green and blue water provision in the Heihe River Basin,NW China〔J〕. Journal of Water & Climate Change,2015,6(4):800 –815.

〔16〕程国栋,肖洪浪,傅伯杰,等. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展〔J〕. 地球科学进展,2014,29(4):431 –437.〔Chen Guodong,Xiao Honglang,Fu Bojie,et al. Advances in synthetic research on the Eco – hydrological process of the Heihe River Basin〔J〕. Advances in Earth Science,2014,29(4):431 –437.〕

〔17〕刘浏,刘丽丽,索滢. 近 53 a 黑河流域水文气象要素时空演变特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):465 –478.〔Liu Liu,Liu Lili,Suo Ying. Spatiotemporal evolution of hydro – meteorological variables in the Heihe River Basin in recent 53 years〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(3):465 –478.〕

Sensitivity Analysis of Runoff to LUCC and climate change in Heihe River Basin

LUO Kai – sheng1,2 TAO Fu – lu 2,3 *

(1. *School of Remote Sensing and Geomatics Engineering*,*Nanjing University of Information Science and Technology*,*Nanjing*,210044,*Jiangsu*,*China*;
2. *Key Laboratory for surface patter and processes*,*Institute of Geographical sciences and Natural resources*,*Chinese Academy of Sciences*,*Beijing*,100101,*Beijing*,*China* ;
3. *College of Resources and Environment*,*University of Chinese Academy of Sciences*,*Beijing*,100049,*China*)

Abstract: To quantitative assessing the sensitivity of runoff to climate and land use/cover change (LUCC) in Heihe River Basin during 1980 – 2009. Multiple data sources (including land – use digital elevation data、soil、weather) spanning from 1980 to 2016 were applied to drive the SWAT,observed runoff data was used for calibration and validation. The results indicate that the sensitivity value of runoff to LUCC is 0.020mm? km – 2,which means that the land use changes 1km^2,and the runoff will change 0.114 mm. Meanwhile,The changes of runoff caused by the variation of the 1mm precipitation in the upstream,middle – stream and downstream were 0.49 –0.288 mm,0.006 –0.038mm and 0 –0.002mm respectively,and the variation of 1℃ in the upstream,middle – stream and downstream were 13.413 –78.902mm, 1.105 –6.500mm and 0.461 –2.710mm. We further found that the sensitivity of runoff to temperature is much higher than that of precipitation. The sensitivity of runoff to LUCC from big to small is upstream (0.108 mm? km – 2), middle reaches (0.004 mm? km – 2) and downstream (0.001 mm? km – 2) from 1980 to 2009. Temporally, the sensitivity of runoff to LUCC in the whole basin shows a downward trend; the upstream region shows a decrease trend, while the downstream shows an increasing trend. The sensitivity of basin runoff to temperature is increasing during 1980 –2009.

Key words: runoff; climate change; land use change; sensitivity; SWAT model, Heihe river